

泥岩の吸水膨張圧と変形の機構

入江 恒爾* 室 達朗** 本多 秀夫*** 竹内 成和*

MECHANISM OF SWELLING PRESSURE AND DEFORMATION
OF MUDSTONE

Tsuneji IRIE Tatsuro MURO
Hideo HONDA Shigekazu TAKEUCHI

(Received June 30, 1978)

The purpose of this study is to analyse the swelling phenomenon of expansive mudstone from mechanical point of view. The property of the swelling pressure and failure has been already reported. The present paper is concerned with the relation between swelling pressure and volumetric strain. Supposing that mudstone is a transverse-isotropic material, the deformation of mudstone during the swelling process is considered theoretically. And tests are performed by using of tri-axial apparatus and the new apparatus which is able to measure swelling pressure, volumetric strain and water absorption. The following results are obtained; 1) The swelling pressure occurred under the condition of zero volumetric strain and shear strain is not hydrostatic pressure. 2) The volumetric strain occurred by the apparent swelling pressure consists of the elastic and the plastic volumetric strain. 3) The elastic volumetric strain depends on the effective stress components of the swelling pressure. 4) The time-hardening theory in the unsteady-state transient creep may be applied to the plastic volumetric strain of mudstone.

1 ま え が き

従来より、泥岩の吸水膨張現象は、モンモリロナイト等の膨潤性粘土鉱物の含有による膨張と非常に弱い粒子間結合力による膨張の複合した現象であることが知られている。しかし実際は、この現象を測定する場合両者を明確に区別できないだけでなく、力学的な挙動に関しても明らかにされていない部分が多い。本研究では、泥岩の吸水膨張現象を力学的にとらえることを目的としている。この報告においては、泥岩を面内等方材料と仮定し有効応力理論をもとに、体積ひずみと吸水膨張圧の関係を弾塑性論により理論的考察をした。一方、軸方向拘束側方一定荷重、側方拘束軸方向一定荷重、完全拘束の条件で吸水膨張試験を行い実験的考察をした。すなわち、弾性体積ひずみと塑性体積ひずみの性状を明らかにし、平衡状態に関しても境界条件の差異を考慮し考察した。また、吸水膨張圧発生にともなうクリープ挙動についても実験的考察をした。

* 建設工学科

** 愛媛大学工学部

*** 三和測量建設 K K

2 吸水膨張過程の理論的考察

吸水膨張現象は、村山ら¹⁾が指摘している理想過程

プロセスⅠ： 軟岩の構造骨格を形成する鉱物粒子自体は吸水せず、有効応力の減少によって間げきが大きくなる。

プロセスⅡ： 間げきは水で満たされていて、ある瞬間から一斉に鉱物粒子が吸水膨潤する。

なお、境界から水は自由に供給されるものとする。

が考えられる。これらの過程は理想的なものであり、実際には吸水とともに両者が同時に進行し区別することができない。しかし、泥岩のように膨張性の大きな岩の場合一般に、プロセスⅡによる膨張体積ひずみはプロセスⅠによるものより一桁以上大きいものである。

2・1 吸水膨張圧の有効応力評価

2・1・1 プロセスⅠの有効応力の変化

プロセスⅠにおける吸水膨張過程の有効応力は、Bishop²⁾の等価間げき圧という考え方をを用いると、

$$\sigma' = \sigma - U_a + X(U_a - U_w) \quad \text{—(1)}$$

と示される。ここに σ' 、 σ 、 U_a 、 U_w 、 X はそれぞれ、有効応力、全応力、間げき空気圧、間げき水圧、飽和度と土の性質により決まる定数である。今、 U_a が大気圧に等しいとすると、 $U_a = 0$ (U_a は大気圧を基準としたゲージ圧で表わされている)となり、(1)式は、

$$\sigma' = \sigma + X(-U_w) \quad \text{—(1a)}$$

と示される。ここで、初期不飽和状態を添字 i 、平衡後の飽和状態を添字 f を用い、それぞれの状態の有効応力を示すと、

$$\sigma'_i = \sigma_i + X_i(-U_w)_i, \quad \sigma'_f = \sigma_f + X_f(-U_w)_f \quad \text{—(2)}$$

となり、有効応力の変化は、(2)式より

$$\sigma'_f - \sigma'_i = (\sigma_f - \sigma_i) + X_f(-U_w)_f - X_i(-U_w)_i \quad \text{—(3)}$$

となる。この式より、プロセスⅠにおける有効応力の変化は、全応力の変化、サクシジョン力 $(-U_w)$ の変化と X の変化で表わされる。

2・1・2 プロセスⅡの有効応力評価法

プロセスⅡにおいて発生する膨張圧を σ_s とし、 σ_s の力学的性質を考察する。(3)式の左辺は、体積ひずみがないとき有効応力は変化しないから、左辺=0となり、右辺第二項は、飽和時にはサクシジョンが零となることより系の平衡点を飽和状態へもっていくと、 $X_f(-U_w)_f = 0$ となり、右辺第三項は、初期試料を完全に乾燥することにより、 $X_i = 0$ 、 $X_i(-U_w)_i = 0$ とすることができる。以上の条件を満足するように吸水膨張試験を行い平衡状態に達した時点で、 $(\sigma_f - \sigma_i) = 0$ となった場合はプロセスⅡによる膨張圧の発生はなかったことになり、 $(\sigma_f - \sigma_i) \approx 0$ となった場合は、 $(\sigma_f - \sigma_i) = \sigma_s$ となり、その存在が実証され量的に抽出できることになる。この膨張圧 σ_s の有効応力成分 σ'_s の評価法は飽和に達し、プロセスⅡによる膨張圧 σ_s が存在している時点で等体積せん断を行い、せん断強度に及ぼす有効応力成分を抽出して評価するものである。図2・1において、曲線ABCは $e \sim \log \sigma'$ 曲線である。今、B点で示す間げき比に調整した試料の場合、完全拘束(等体積)

条件のもとで膨張圧 σ_s が発生すると仮定する。もし有効応力成分が存在する場合、 σ'_s は、見かけ上直線 \overline{BD} 上のある点に存在することになる。しかし間げき比は、 $e = V_v/V_s$ と示され、膨張により V_s が増加し V_v が減少することになり、間げき比は減少する。また、力学的挙動に影響を及ぼす間げき比は、吸水により増加した鉱物粒子層間の間げきを除いた実質の間げき比であると考えられる。したがって見かけ上直線 \overline{BD} 上にある点は、実際は曲線 BC 上にあると考えられる。ここで、 σ_s の有効応力成分が零の場合前述の実質の間げき比は e_1 となり、 σ'_s が区間 $12, 13, 14$ ($\sigma'_s = \sigma_s$) の場合、それぞれの間げき比は e_1, e_2, e_3, e_4 となる。次に前述の試料と同一粒度分布、ほぼ同一含水比で非膨潤性粘土鉱物を含む試料の間げき比 e_1, e_2, e_3, e_4 に調整し、等体積せん断を行うと、図 2・2 ができる。この図の包絡線はベクトルカーブ包絡線ではなく、それぞれの有効応力における最大せん断応力をはじめの有効応力値の真上に移した点を連ねた線であり、間げき比の減少により傾き ϕ (内部摩擦角) が大きくなる。³⁾ ここで図 2・1 に示される点 1, 2', 3', 4' が、図 2・2 の同一有効応力で同一間げき比の包絡線上の点 1'', 2'', 3'', 4'' とプロットされ、曲線 EF が定まる。この二つの図より、膨潤性粘土鉱物を含む試料の等体積せん断による最大せん断応力 τ_b を図 2・2 の曲線 EF 上に移すとその時の有効応力 σ'_b が定まり、($\sigma'_b - \sigma'_1$) が膨張圧 σ_s の有効応力成分であると考えられる。また、 σ'_b を図 2・1 に移すとその時の実質の間げき比が定まる。以上よりプロセス II の膨張圧 σ_s の有効応力成分 σ'_s 、有効応力の分担率 n は、つぎのように示される。

$$\sigma'_s = n \sigma_s, \quad n = (\sigma'_b - \sigma'_1) / (\sigma'_4 - \sigma'_1) \quad \text{— (4)}$$

2・1・3 検証結果

2・1・2の方法により検証した結果を表 2・1 に示す。この検証によりプロセス II の膨張圧 σ_s を量的に抽出することができた。また、等体積せん断は過圧密比を 3 で行うため、有効応力 0.2 kg/cm^2 間げき比 0.753 は試験できたが、有効応力 1.2 kg/cm^2 、間げき比 0.60 は試験機の最大定格を超えるので試験できなかった。しかし、これらのデータより、プロセス II の膨張圧 σ_s を抽出することが可能であることと、その有効応力成分 σ'_s が存在することが確認できた。

Sample	混合比(重量)	q_s	e	σ'_s (kg/cm^2)	τ_b (kg/cm^2)	σ'_s (kg/cm^2)
No.1	標準砂 50% 天然砂 50%	2.61	0.840	0.750	0.643	-
No.2	標準砂 50% 天然砂 50%	2.61	0.760	0.975	0.644	-
No.3	標準砂 50% 天然砂 50%	2.66	0.753	-	0.137	0.2

表 2・1
プロセス II の膨張圧と
有効応力検証結果

2・2 弾性論による理論的考察

ここでは、泥岩を面内等方材料⁴⁾と仮定し、せん断力発生にともなうダイラタンシーを考慮し考察する。前報告⁵⁾より弾性体積ひずみは、

$$-(\Delta V/V)e = (1 - 2\mu_{HV})\sigma'_V/E_V + 2(1 - \mu_{HV} - \mu_{HH})\sigma'_H/E_H \quad \text{— (5)}$$

となる。ここに、 σ' 、 E 、 μ 、 $\Delta V/V$ は、有効応力、ヤング係数、ポアソン比、体積ひずみである。一方、せん断力発生にともなうダイラタンシーによる体積ひずみについては、面内等方材料の場合

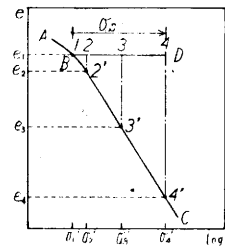


図 2・1 $e \sim \log \sigma'$ 曲線

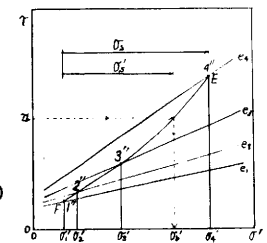


図 2・2 最大せん断
応力包絡線

の最大せん断応力が,

$$\tau_{max.} = 1/2 (\sigma_v - \sigma_h) = 1/2 (\sigma'_v - \sigma'_h) \quad (6)$$

となるから,

$$-(\Delta V/V)_D = D/2 (\sigma'_v - \sigma'_h) \quad (6)$$

となる。ここに、 D はダイレタンス係数である。(5),(6)式より、体積ひずみは

$$-(\Delta V/V) = (1 - 2\mu_{HV}) \sigma'_v / E_v + 2(1 - \mu_{HV} - \mu_{HH}) \sigma'_h / E_H + D/2 (\sigma'_v - \sigma'_h) \quad (7)$$

となり、ここで、 $(1 - 2\mu_{HV}) / E_v = C_{S1}$ 、 $(1 - \mu_{HV} - \mu_{HH}) / E_H = C_{S2}$ とおくと、

$$-(\Delta V/V) = C_{S1} \sigma'_v + 2 C_{S2} \sigma'_h + D/2 (\sigma'_v - \sigma'_h) \quad (7a)$$

と示される。

次に、吸水膨張現象がプロセスIのみで発生する場合を考える。泥岩は非常に過圧密された粘土、と考えることができ、間げきには負圧が作用しているため、通常の状態では有効応力が存在している。これを $2 \cdot 1 \cdot 1$ で述べた Bishop の等価間げき圧を用いて示すと、

$$\sigma' = \sigma - U = \sigma + X(-U_w) \quad (1a)$$

となり、 $-X(-U_w)$ が負圧となる。ここで、吸水により負圧は減少するから有効応力が減少し、その分だけ体積ひずみ、膨張圧が発生することになる。また、この場合有効応力は間げき圧に依存しているから、 $\sigma'_h \approx \sigma'_v$ と考えられる。初期有効応力を σ'_{i0} とすると(7a)式より、

$$-(\Delta V/V)_I = (C_{S1} + 2 C_{S2}) (\sigma'_v - \sigma'_{i0}) \quad (8)$$

となる。一方、プロセスIIのみで発生する場合を考える。この過程は鉱物粒子自身の膨潤によるもので、有効応力、間げき圧が正の方向へ増加すると考えられる。今、発生する膨張圧を σ_s 、その有効応力成分を σ'_s とすると、各軸方向に対して次のような有効応力が発生する。

$$\sigma'_{sV} = n_v \sigma_s \quad \sigma'_{sH} = n_H \sigma_s \quad (9)$$

ここに、 n_v 、 n_H は、膨張圧の有効応力の分担率である。ここで、膨張間げき圧(間げき水圧、間げき空気圧、プロセスIIの膨張圧の有効応力成分でないものの総称)は、各軸とも等しくなければならぬから、 $(1 - n_v) \sigma_{sV} = (1 - n_H) \sigma_{sH}$ となり、(9)式は

$$\sigma'_{sV} = n_v \sigma_{sV} = \{ n_v (1 - n_H) / (1 - n_v) \} \sigma_{sH} \quad (9a)$$

$$\sigma'_{sH} = n_H \sigma_{sH} = \{ n_H (1 - n_v) / (1 - n_H) \} \sigma_{sV} \quad (9b)$$

と示される。(7a),(9b)式より

$$-(\Delta V/V)_{II} = C_{S1} (-\sigma'_{sV}) + 2 C_{S2} \{ -n_H (1 - n_v) / n_v (1 - n_H) \} \sigma'_{sV} + D/2 (\sigma'_{sV} - \sigma'_{sH}) \quad (10)$$

となる。しかし、一般の状態では両プロセスが同時に進行するから、(8),(10)式より次のように示される。

$$-(\Delta V/V) = C_{S1} (\sigma'_v - \sigma'_{i0}) + 2 C_{S2} \{ \sigma'_v - \{ n_H (1 - n_v) / n_v (1 - n_H) \} \sigma'_{sV} - \sigma'_{i0} \} + D/2 (\sigma'_{sV} - \sigma'_{sH}) \quad (11)$$

2・3 塑性論による理論的考察

泥岩の吸水膨張現象の塑性挙動部分を理論的に考察しようとする場合、この現象自身が体積ひずみをとまうため、既存の塑性論を用いる場合矛盾を生じることになる。したがってここでは、泥

岩を等方材料とし、Normality Rule を満足すると仮定して考察する。⁶⁾⁷⁾

上述の仮定より、次の式が成立する。

$$dv^P / \sqrt{2 I_2} = -d(\sqrt{2 J_2}) / d\sigma'_m \quad \text{---(12)}$$

ここに、 $2 I_2 = d e_{ij}^P d e_{ij}^P$, $2 J_2 = s_{ij} s_{ij}$

($e_{ij} = e_{ij} - v d_{ij} / 3$, $s_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma_m \delta_{ij} / 3$) である。

一方、 $dv^P / \sqrt{2 I_2}$ が応力の不変量関数である σ'_m と J_2 の関数として表現されたとすると、この関数は Associate Flow Rule であり、上記の微分方程式を解くことにより、ひずみ速度の方向を決定するポテンシャル面を定めることができる。

今、本報告の吸水膨張試験の境界条件

A) $\epsilon_X = 0$, $\epsilon_Y = 0$, $\sigma_X = 0$, $\sigma_Y = \sigma_0$ (軸方向拘束側方一定荷重条件)

B) $\epsilon_v = 0$, $\epsilon_\ell = 0$, $P_v = P_0$, $P_\ell = 0$ (軸方向一定荷重側方拘束条件)

について、(12)式を解くと、次のようになる。

A) の場合

$$(\sigma_1 - \sigma_3) / 2 = 3 \sqrt{3/2} (\sigma'_m + A^*) / 2$$

(A^* は、 $\sqrt{2 J_2} / \sigma'_m = 0$ のとき $\sigma'_m = -A^*$ である)

したがって、ポテンシャル面が定まる。

B) の場合 $\sqrt{2 I_2} = 0$ となり、ポテンシャル面が定まらないことになる。

以上より、A) の条件では、塑性域でのひずみ速度の方向が決定され破壊することが考えられるが、B) の条件では、ひずみ速度の方向が定まらず、平衡状態までしか吸水膨張現象は進行しないと考えられる。

3 吸水膨張試験およびクリープ試験

3・1 試料

試料は、岡山県哲西町の工事現場より採取してきたもので、新生代第三紀の泥岩である。この試料は二種類であり、一つは中国高速道路の調査用ボーリングコアであり、他はリッピング作業現場より岩塊として採取したもので、両者とも実験室内で自然乾燥させたものである。表 3・1 に、ボーリングコア試料を泥岩 A、岩塊の試料を B とし、真比重 G_s 、気乾状態における湿潤密度 γ_t 、空げき率 n 、含水比 w_i 、試験条件、粒度分布、コンシステンシー試験結果、泥岩 B の C. E. C. (陽イオン交換容量) 試験結果⁸⁾ を示す。A-1 ~ A-5 は三軸吸水膨張試験に、A-6 ~ A-8 はクリープ試験に、B-1 ~ B-3 は完全拘束吸水膨張試験に、B-4 ~ B-20 は軸方向一定荷重側方拘束吸水膨張試験に使用した。また、膨潤性粘土鉱物モンモリロナイトの含有について、泥岩 A は前報告で、泥岩 B は泥岩 A と同様に X 線回折により含有の確認をしてある⁵⁾⁹⁾ 試験用供試体の成型にあたっては、泥岩の成層面に垂直な方向が円柱状供試体の軸方向に一致するようにした。泥岩 A は直径 50 mm、高さ 120 mm に、泥岩 B は直径 58 mm、高さ 20 mm にして、両端面をサンドペーパーで入念に平滑に仕上げた後に上述の各々の試験に使用した。

3・2 吸水膨張試験法およびクリープ試験法

3・2・1 新しい試験機の開発と吸水膨張試験法

泥岩は吸水膨張量が大きいだけでなく乾燥収縮量も大きいので、自然乾燥だけで多くのクラックが発生する。ボーリングによって試料を採取できる場合、供試体を成型するのは容易であるが、実際はボーリングによって試料を得ることは容易でない。泥岩Bのように岩塊として採取した後自然乾燥状態にして成型する場合、泥岩の低強度、クラックにより効率よく供試体を得ることは不可能

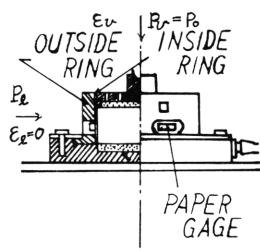


図 3・1
新しい吸水膨張試験機

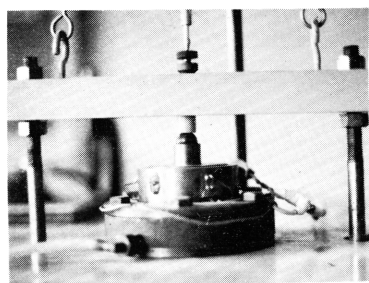


写真 3・1
新しい吸水膨張試験機

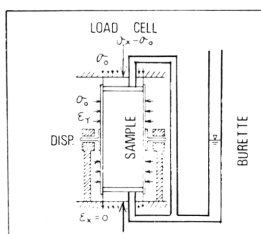


図 3・2
三軸吸水膨張試験機

Sample No.	G_s	$\gamma_{t,3}$ g/cm ³	n %	W_i %	Test Condition
A-1	2.61	2.25	17.3	4.40	$\sigma_o = 1.0$ (kg/cm ²)
A-2	2.57	2.22	17.9	5.21	
A-3	2.57	2.26	16.1	2.82	
A-4	2.62	2.30	5.0	4.10	
A-5	2.62	2.31	4.5	4.10	
A-6	2.60	2.28	-	-	$\sigma = 10.38$
A-7	2.66	2.30	-	-	
A-8	2.58	2.30	-	-	
A-9	2.58	2.30	-	-	
B-1	2.71	2.23	20.7	3.74	$dV/V = 0.0$ (%) $P_o = 0.0$ (kg/cm ²)
B-2	2.73	2.21	21.7	3.23	
B-3	2.72	2.21	21.3	3.13	
B-4	2.71	2.19	21.8	3.30	
B-5	2.72	2.23	21.0	3.59	
B-6	2.71	2.16	21.7	3.25	
B-7	2.71	2.26	19.3	3.38	
B-8	2.71	2.17	22.4	3.31	
B-9	2.71	2.25	19.7	3.19	
B-10	2.73	2.22	21.1	3.07	
B-11	2.72	2.23	20.7	3.47	
B-12	2.71	2.26	19.5	3.58	
B-13	2.72	2.19	22.0	3.42	
B-14	2.73	2.18	22.4	3.27	
B-15	2.71	2.24	20.0	3.24	
B-16	2.71	2.27	19.4	3.67	
B-17	2.73	2.22	21.3	3.12	
B-18	2.72	2.26	19.9	3.72	
B-19	2.73	2.14	24.5	3.91	
B-20	2.72	2.25	20.1	3.77	

(A) Physical Property of Sample and Test Condition

Sample No.	B-a	B-b	B-c	B-d	B-e	B-f	
Ca ²⁺	1.36	1.13	1.57	1.70	1.63	1.21	meq/100g
Mg ²⁺	6.73	6.59	5.31	7.63	7.06	6.66	meq/100g
K ⁺	1.01	1.02	0.942	2.06	1.09	0.734	meq/100g
Na ⁺	1.53	1.61	1.43	1.66	1.27	0.708	meq/100g
Total	10.6	10.4	9.25	12.2	11.1	9.31	meq/100g
C.E.C (NH ₄ ⁺)	24.8	28.7	18.9	28.8	17.9	20.8	meq/100g

(C) Result of C.E.C (Sample B)
(meq: ミリグラム当量)

Sample No.	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	
A-1	17.3	80.6	2.4	
A-2	35.0	59.2	5.8	
A-3	72.2	26.7	1.1	
A-4	78.7	20.0	1.3	L.L. = 35.4(%) P.L. = 24.0(%) I.P. = 11.4
A-5	78.7	20.0	1.3	
A-6	19.2	78.3	2.5	
A-7	19.2	78.3	2.5	
A-8	19.2	78.3	2.5	
B	36.3	8.7	55.0	L.L. = 40.2(%) P.L. = 24.9(%) I.P. = 15.3

(B) Result of Mechanical Analysis and Consistency Limit

表 3・1 試料の物理・化学的性質と試験条件

である。そこで、どのような試料からでも供試体を効率よくつくれること、なるべく多くの境界条件を選択できること、装置が簡単なことを目標に新しい吸水膨張試験機を開発した。この試験機は図3・1、写真3・1に示すもので圧密リングとよく似た形をしている。このリングは内径58mm高さ35mmで二重になっており、内側のリングは側方膨張圧測定用で、三箇所にはペーパーゲージがつけられレコーダーで側方膨張圧を連続記録している。外側のリングは側方ひずみを零にするための拘束用リングである。一方、供試体の軸方向は圧密試験機の荷重載荷機構をそのまま利用することにより、一定荷重載荷、荷重の増減により軸ひずみを零に保つことができる。この装置によって三次元的（ただし軸対称）に泥岩の吸水膨張挙動を測定することが可能である。^{5) 10) 11)} この装置を使用して、片面吸水側方拘束で、次の境界条件によって吸水膨張現象を側方膨張圧 P_L 、吸水量 W 、時間 T 、体積ひずみ $\Delta V/V$ あるいは軸方向膨張圧 P_v を同時測定しとらえた。

- (1) 完全拘束条件 $P_v \neq 0$, $P_L \neq 0$ $\epsilon_v = \Delta V/V \neq 0$ $\epsilon_L = 0$
 (2) 軸方向一定荷重側方拘束条件 $P_v = P_0$, $P_L \neq 0$, $\epsilon_v = \Delta V/V \neq 0$, $\epsilon_L = 0$
 (3) 軸方向自由側方拘束条件 $P_v = 0$, $P_L \neq 0$, $\epsilon_v = \Delta V/V \neq 0$, $\epsilon_L = 0$

3・2・2 三軸吸水膨張試験法とクリープ試験法

この試験法は前報告と同様であり、図3・2に示す装置で、 $\epsilon_x = 0$, $\epsilon_y = \epsilon_z \neq 0$, $\sigma_x = 0$, $\sigma_y = \sigma_z = \sigma_0$ なる境界条件で吸水膨張試験するものである。^{5) 12)} また、単軸拘束状態で泥岩は見かけ膨張圧が単軸圧縮強度の約60%に達するとクリープをおこすので、そのクリープ試験を行った。¹³⁾ この試験法は、上述の境界条件で吸水膨張させ、吸水量、膨張圧、体積ひずみが平衡状態に達した後、一定荷重載荷によりおこった。この場合、吸水膨張試験時も周圧は一定のままであり、載荷重 σ の選択は平衡時の泥岩の含水比における単軸圧縮強度の60%を目安とした。

4 試験結果および考察

4・1 完全拘束試験結果と考察

図4・1は新しい試験機による完全拘束試験実測例である。この図の P_v , P_L , W はそれぞれ、軸方向膨張圧、側方膨張圧、吸水量である。吸水量が $T = 1 \text{ min}$ において大きく出ているのはポーラストンと供試体の間げきのためであり、 P_L が P_v より遅れて発生しているのは、 P_L 測定系の感知遅れ（膨張が供試体の下面からおきるためペーパーゲージとの間隔が大きく感知できない）が原因である。したがって、 W はサクシオン力と透水係数に依存するため、 W は P_L , P_v よりやや先行し、 P_v , P_L は同時に発生すると考えられる。図4・2は、 P_v と P_L の関係を示し、図中一点鎖線は $P_v = P_L$ を示す線である。膨張圧の発生を示す線がでこばこしているのは、 P_v 測定系の分銅のとりかえ

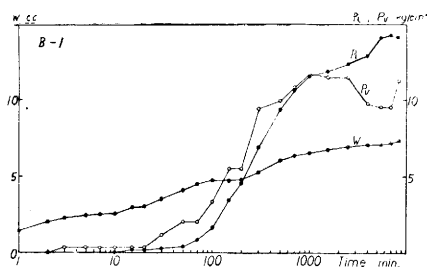


図4・1 完全拘束試験実測例 (B-1)

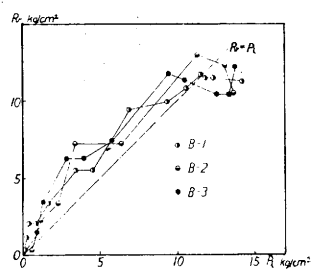


図4・2 完全拘束試験結果

によるものである。また、 $P_L \leq 1.0 \text{ kg/cm}^2$ で、 P_0 が大きくていてのは P_L 側定系の感知遅れによるものである。したがって、これらを考慮すると、完全拘束条件において膨張圧は、 $P_L \leq 4 \text{ kg/cm}^2$ で等方的に発生し、平衡状態に近づくにしたがって異方的に発生するようになると思われる。

4・2 軸方向一定荷重側方拘束試験結果と考察

図4・3は、この境界条件における実測例である。この図より見かけ膨張圧 Q_1 と体積ひずみ $\Delta V/V$ は、

$$Q_1 = P_L - (1 + K_0) P_0 = a(1 - e^{-kt^n}), \quad \Delta V/V = b(1 - e^{-\ell t^n}) \quad (13)$$

a: 最大見かけ膨張圧, b: 最大体積ひずみ, t: 時間(分), k, ℓ , m, n:

反応速度係数, K_0 : 含水比により変化する定数(この場合 $K_0 = 0.16$ $W = 4 \sim 12\%$)と示され、⁷⁾ この結果を表4・1に示す。

[見かけ膨張圧 Q_1 と体積ひずみ $\Delta V/V$ の関係]

図4・4, 4・5は、 Q_1 と $\Delta V/V$ の関係を示すものである。 $Q_1 = 0 \text{ kg/cm}^2$ で $\Delta V/V$ がかなりばらついているが、これは P_L 測定系の感知遅れによるものであると考えられる。この図より Q_1 がある値 Q_c に達すると $\Delta V/V$ が急に増加するようになる。このことより、ある値 Q_c は弾性域と塑性域の境

Sample No.	Initial water content Wi (%)	Final water content Wf (%)	Max. apparent swelling pressure a (kg/cm ²)	k	m	Max. volumetric strain b (%)	l	n	K ₁	K ₂
A-1	4.40	11.02	7.27	2.13×10^{-8}	1.83	2.68	8.91×10^{-8}	1.67	1.38	2.56
A-2	5.21	13.34	7.26	1.24×10^{-2}	0.62	3.36	4.15×10^{-3}	0.67	1.80	0.23
A-3	2.82	10.58	2.92	2.09×10^{-3}	0.81	8.44	1.00×10^{-3}	0.86		
A-4	4.10	11.37	3.15	1.03×10^{-3}	1.51	2.84	7.59×10^{-4}	0.69		
A-5	4.10	11.37	9.78	4.81×10^{-3}	0.68	5.74	4.66×10^{-4}	0.90		
B-4	3.30	11.36	14.15	2.01×10^{-4}	1.45	3.99	1.26×10^{-2}	0.73	2.19	2.38
B-5	3.59	10.88	12.1	7.81×10^{-5}	1.42	3.20	4.71×10^{-3}	0.78		
B-6	3.25	11.49	6.30	1.91×10^{-3}	1.05	1.87	1.49×10^{-2}	0.80	1.72	7.89
B-7	3.38	10.94	16.98	1.73×10^{-4}	1.40	1.80	3.21×10^{-3}	0.90		
B-8	3.31	11.56	16.6	8.14×10^{-5}	1.43	0.90	2.08×10^{-3}	1.80		
B-9	3.19	10.00	24.25	2.01×10^{-5}	1.78	1.21	1.32×10^{-3}	1.02		
B-10	3.07	11.24	4.81	1.71×10^{-5}	1.94	1.13	3.52×10^{-3}	1.14	2.77	17.0
B-11	3.47	10.66	6.35	1.22×10^{-11}	3.75	1.13	1.60×10^{-4}	1.33		
B-12	3.58	9.86	9.57	3.40×10^{-4}	1.18	0.93	1.14×10^{-4}	1.36		
B-13	3.42	10.88	-	-	-	0.74	5.23×10^{-3}	0.90		
B-14	3.27	11.42	22.07	3.77×10^{-7}	2.80	0.76	2.86×10^{-3}	1.10		
B-15	3.24	10.45	22.9	1.95×10^{-2}	3.05	1.09	1.86×10^{-3}	0.93	8.17	28.7
B-16	3.67	9.95	14.06	3.59×10^{-7}	2.15	0.96	5.65×10^{-2}	0.78		
B-17	3.12	10.67	-	-	-	0.71	1.18×10^{-3}	0.80		
B-18	3.72	10.06	-	-	-	0.94	5.29×10^{-4}	0.85		
B-19	3.91	11.52	-	-	-	0.35	1.73×10^{-3}	1.62		
B-20	3.77	10.82	8.17	1.96×10^{-6}	2.16	0.58	4.90×10^{-3}	1.00		

表4・1 吸水膨張試験結果

界点であると考えられ、 $Q_1 \leq Q_c$ は弾性域、 $Q_1 \geq Q_c$ は塑性域となる。ここで(11)式をこの境界条件で変形すると次のようになる。

$$\Delta V/V = -(C_{S1} + 2C_{S2})(P_0' - \sigma_{10}') + \{C_{S1} + 2\{n_H(1 - n_V)/n_V(1 - n_H)\}C_{S2}\}\sigma_{SV}' - 2C_{S2}(Q_1 + K_0 P_0') - D(Q_1 - Q_c)/2 \quad (11a)$$

図上の $Q_1 \leq Q_c$ において軸方向一定荷重 P_0 が大きくなるにつれて、 $(\Delta V/V)/Q_1$ が小さくなる傾向がある。これは(11a)式の右辺第一・二項で示されるように、サクシヨン力のばらつきと有効応力分担率の変化によると考えられる。 $Q_1 \geq Q_c$ における $(\Delta V/V)/Q_1$ が小さくなる傾向があるのは、軸方向一定荷重 P_0 によるダイレタンス係数Dの変化であると考えられる。

図4・6は側方膨張圧 P_L 、体積ひずみ $\Delta V/V$ と軸方向一定荷重 P_0 の平衡時における関係を示すもので、 $\Delta V/V$ は平衡時において P_L よりも P_0 の影響が大きいことがわかり、実験式

$$(\Delta V/V) = 5.10 e^{-0.740\sqrt{P_0}}$$

が得られた。また、 P_L に大きなばらつきがあるが、これは供試体のばらつきと考えられる。図中の一点鎖線 δ は図 4・4、4・5 の $Q_1 = Q_c$ における $\Delta V/V$ をプロットした点の近似直線である。これより平衡状態は、 $P_0 \leq 8.5 \text{ kg/cm}^2$ で塑性域に、 $P_0 \geq 8.5 \text{ kg/cm}^2$ で弾性域にあることがわかる。 $P_0 \leq 3 \text{ kg/cm}^2$ で弾性体積ひずみの部分が大きくなっているのは、(11a)式の右辺第一・二項による、

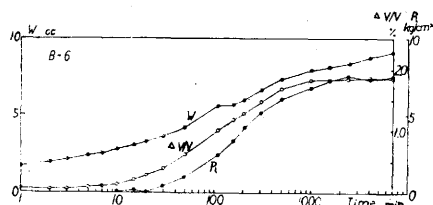
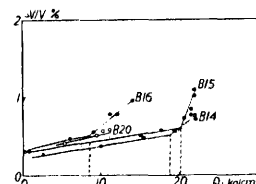
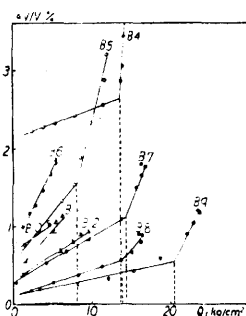
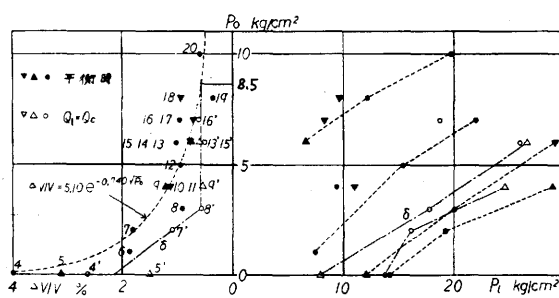


図 4・3 実測例 (B-6)

図 4・5 $\Delta V/V$ と Q_1 の関係図 4・4 $\Delta V/V$ と Q_1 の関係図 4・6 P_0 と $\Delta V/V$, P_0 の関係
(図中番号は試料 N_0)

膨張圧の有効応力分担率の増大であろうと推定される。

[見かけ膨張圧 Q_1 と含水比 W の関係]

この Q_1 と W の関係は前報告⁵⁾で報告したように、次の式で示され、結果を表 4・1 に示す。

$$Q_1 = P_L - (1 + K_0)P_0 = K_1W - K_2 \quad (K_1, K_2 \text{ は定数}) \quad (14)$$

4・3 三軸吸水膨張試験結果と考察

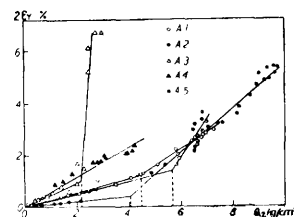
見かけ膨張圧 Q_2 、体積ひずみ $\Delta V/V$ は、

$$Q_2 = \sigma_X - \sigma_0 = a(1 - e^{-kt^a}) \quad , \quad \Delta V/V = 2\varepsilon_Y = b(1 - e^{-lt^b}) \quad (13a)$$

$$Q_2 = \sigma_X - \sigma_0 = K_1W - K_2 \quad (14a)$$

と示され、⁷⁾この結果を表 4・1 に示す。

図 4・7 は、 Q_2 と $2\varepsilon_Y$ ($\Delta V/V$) の関係を示すもので、4・2の結果と同様な傾向を示しているが、拘束軸は一軸だけであるため塑性域にかなりはいつて平衡状態に達している。このことより、拘束軸が多いほどそして一定荷重が大きいほど平衡状態に達する時の体積ひずみは小さくなることがわかる。また、(11)式よりこの境界条件では次のようになる。

図 4・7 Q_2 と $2\varepsilon_Y$ の関係

$$\Delta V/V = -(C_{S1} + 2C_{S2})(\sigma'_0 - \sigma'_{I0}) + [C_{S1} + 2\{n_V(1-n_H)/n_H(1-n_V)\}C_{S2}]\sigma'_{OH} - C_{S1}Q_2 - D(Q_2 - Q_c)/2 \quad (11b)$$

〔塑性体積ひずみとクリープ挙動〕

(11a), (11b)式の塑性体積ひずみ $V_P \{=(\Delta V/V)_D\}$ は,

$$V_P = -D(Q - Q_c)/2$$

であるから, 上式に(13)あるいは(13a)式の見かけ膨張圧の実験式を代入し時間 t で微分すると次のようになる。

$$\dot{V}_P = -\frac{1}{2}DKmt^{m-1}e^{-kt^m} = -\frac{1}{2}DKm(a-Q)t^{m-1}$$

この式は, 非定常遷移クリープにおける時間硬化理論が成立することを意味している。なおこの理論は, 4・2の塑性体積ひずみについても成立する。

4・4 クリープ実験結果と考察

図4・8は, 三段階の一定荷重を与えた場合のクリープ試験結果である。試料A-6・A-7は, 10000min 以内でPrimary stageに, A-8はtertiary stageに達している。表4・2は, Primary stageにおけるクリープ定数を示した。また, 泥岩のような多孔質材料ではひずみ硬化が予想されるので, Nortonの式(1次クリープ $\dot{\epsilon} = B\sigma^m \epsilon^{-\alpha}$)を適用し定数を求めた結果, $B = 1.3 \times 10^{-22}$, $m = 18.17$, $\alpha = 6.15$ となった。したがって, 見かけ膨張圧が単軸圧縮強度の約60%以上に達して平衡状態に至る場合, クリープが発生し塑性体積ひずみが減少すると同時に, クリープ破壊が起こりうる可能性があると考えられる。

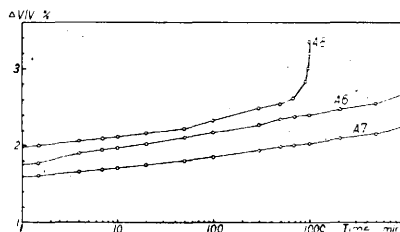


図4・8 クリープ試験結果

表4・2 クリープ定数

(Primary stage,

$$\Delta V/V = a + b \log t)$$

Sample No.	Final water content Wf (%)	a	b	Coefficient of correlation r	Creep load (kg/cm ²)
A-6	12.22	1.751	0.2176	0.977	10.38
A-7	11.39	1.553	0.1637	0.994	14.42
A-8	10.76	1.959	0.1617	0.989	14.42

5 結 論

以上, 膨張性岩である泥岩を対象に吸水膨張現象を有効応力理論をもとに弾塑性論により理論的に考察し, 実験によりこの現象を考察した結果, 得られた知見を下記に示す。

- (1) プロセスIIにおける膨張圧のすべては膨張間げき圧ではなく, 有効応力成分が存在する。
- (2) 完全拘束条件における膨張圧は, 発生する膨張圧の値が小さい ($P_\ell \leq 4 \text{ kg/cm}^2$) ととき等方的であるが, 平衡状態に近づくにしたがい異方的に発生する。
- (3) 泥岩の吸水膨張における体積ひずみは, 弾性体積ひずみと塑性体積ひずみにわけられその境界は見かけ膨張圧 Q_c で示され, 降伏面が存在する。弾性体積ひずみは, 理論より

$$\Delta V/V = -(C_{S1} + 2C_{S2})(P'_0 - Q'_{I0}) + [C_{S1} + 2\{n_H(1-n_V)/n_V(1-n_H)\}C_{S2}]\sigma'_{SV} - 2C_{S2}(Q_1 + K_0P'_0)$$

で与えられ、実験による弾性域の $(4V/V)/Q_1$ の変化より膨張圧の有効応力分担率の変化がみられる。塑性体積ひずみには非定常遷移クリープにおける時間硬化理論を適用できる。

(4) 一軸拘束条件での平衡点は、二軸拘束条件の場合より塑性域にかなりはいつている。二軸拘束条件での平衡点は、軸方向一定荷重により影響され、その一定荷重が 8.5 kg/cm^2 以上の時は弾性域内にある。

なお、本報告の一部は第11, 12回土質工学研究発表会^{7) 13)}にて発表した。本研究の試験に使用した泥岩Aは、日本道路公団広島建設局柴山吉晴氏より御提供いただき、C. E. C試験、X線回折、その他に多くの方の御協力を得たことを記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 村山朔郎・関口秀雄・鳥井原誠・沢田守生；軟岩の吸水膨張に関する一考察，京大防災研究所年報第17号B(昭49.1)，PP.391~401
- 2) Bishop, A.W., I. Alpan, G. E. Blight, and I. B. Donald; Factors controlling the strength of partly saturated cohesive soil, PP.503
- 3) 土質工学会；土質試験法，pp.361~389
- 4) Barden, L.; Stress and Displacements in a Cross-Anisotropic Soil, Geotechnique, Vol.13 No.2, (1963) pp.198~210
- 5) 入江恒爾・室達朗・山崎修二；膨張性泥岩の吸水膨張圧と破壊に関する二・三の考察
福井大学工学部研究報告第24巻第2号，昭和51年9月，pp.361~372
- 6) 足立紀尚・西好一・藤本和義；軟岩の構成式と長期強度・変形特性，第5回岩の国内シンポジウム講演集(1977)，pp.139~143
- 7) 入江恒爾・室達朗・本多秀夫；吸水膨張圧による泥岩のクリープ挙動，第12回土質工学研究発表会，土質工学会，昭和52年6月，pp.1069~1072
- 8) 日本粘土学会；粘土ハンドブック，pp.576~578
- 9) 室達朗・山崎修二；膨張性岩の吸水膨張圧と破壊，第10回土質工学研究発表会・土質工学会，昭和50年6月，pp.783~786
- 10) A. Komornik, J. G. Zeitlen; An Apparatus for Measuring Lateral soil swelling Pressure in Laboratory, Proc. of the 6th. I. C. S. M. F. E. (1965) pp.278~281
- 11) 村山朔郎・八木則男；粘板岩の吸水膨張について，京大防災研究所年報第8号(昭和40.3) pp.1~12
- 12) G. Kossiff, R. Baker; Swelling Pressure Measured by Uni- and Triaxial Techniques, 7th. I. C. S. M. F. E., Mexico, (1969) pp.215~218
- 13) 室達朗・本多秀夫；泥岩の吸水膨張圧と変形に関する一考察，第11回土質工学研究発表会・土質工学会，昭和51年6月，pp.361~389

